

漂浮式海上风电运维可行性分析

肖德仁

中电建新能源集团股份有限公司 北京 100020

【摘要】随着全球能源格局的转变，风能作为一种可再生的清洁能源对实现碳中和目标至关重要。相对于传统的陆上风电及固定基础的海上风电，漂浮式海上风电因其能够利用更深海域、更强劲且稳定的风力资源，以及避免与沿海地区的土地使用冲突等优势而备受关注。然而，漂浮式海上风电项目的成功实施，除了前期施工技术的成熟外，更重要的是对其进行长期、高效、安全的运维管理，以提高运行效率、寿命周期成本及环境可持续性，也是评价项目整体可行性的重要因素。在此背景下，本文概述了漂浮式海上风电技术基础，分析了运维可行性，提出了运维策略与技术手段，并在具体案例中获得经验借鉴，旨在为运维人员提供参考。

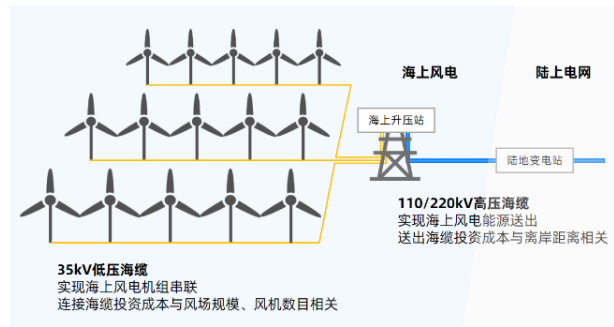
【关键词】漂浮式海上风电；运维可行性；策略与技术

近年来，海上风电正从浅近海向深远海发展，深远海漂浮式风电技术的兴起，为海上风电开辟了一条新的道路。漂浮式海上风电技术利用浮体结构支撑风电机组，既能突破深海固定风电的局限性，又能获得更加丰富的风能资源。由于其灵活、环保、适应能力强等优点，使其成为未来海上风电的重要发展方向。在漂浮式海上风电项目中，运行维护发挥着关键作用。由于深远海环境复杂多变，环境条件十分恶劣，导致运营成本高。因此，先进的运维管理设备与技术已成为漂浮式海上风电工程安全运行的重要保障。这些设备与技术包括专门设计的船舶、无人机及潜水器等，还具备远程监测、自动控制、数据分析等智能功能，共同保障风电装备的高效、稳定运行。

1 漂浮式海上风电技术基础

风电的原理是由风力带动风车叶片旋转，通过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机发电。依据风车技术，大约是每秒三米的速度（微风的程度），便可以开始发电。风电不需要使用燃料，也不会产生辐射或空气污染。风电所需要的装置，称作风电机组。这种风电机组，大体上可分为风轮、发电机和塔筒三部分，如图一海上风电工作原理示意图所示。漂浮式海上风电技术因其独特的技术原理与特点，在海上风电领域具有广阔的应用前景。漂浮式基础结构形式多样，半潜式浮基由于其适用水深范围广、技术成熟程度较高，已成为主流选择。此外，单点系泊技术可降低海上风电平台的系泊系统复杂度，从而提高其柔性与稳定性。风电机组与漂浮基础的一体化技术，是实现漂浮式海上风电高效发电的关键，通过优化风电机组与漂浮基础连接结构，保证风电机组在复杂海洋环境下能够稳定运行，提高发电效率，该综合技术也涉及动态海缆系统的应用，以保证电力传输的可靠性与安全性。漂浮式海上风电技术具有高

效、稳定的特点，由于海上风力资源更加稳定，漂浮式风电平台可实现持续、高效的发电，其年发电小时数远高于陆上风电。同时，结合先进控制策略与优化设计，实现漂浮式海上风电平台在恶劣海况条件下的稳定运行，保障电网安全可靠、连续供电。因此，漂浮式海上风电技术因其独特的技术原理及特性，对拓展海上风电领域、提高其发电效率及稳定性具有明显优势。随着漂浮式海上风电技术的不断进步及成本的进一步降低，漂浮式海上风电将成为未来海上风电的重要发展方向^[1]。



图一：海上风电工作原理示意图

2 运维可行性分析

首先，技术优势与运维便利性。漂浮式海上风电技术因其特有的深海部署能力，可充分利用深海风力资源，大幅提高发电效率和生产能力。在技术优势方面，采用先进的锚泊系统、浮动平台和智能监测技术，为风电机组在复杂海况下的稳定工作提供保障。在维护便利性方面，通过对风电机组的远程监测和数据分析，能够实时监控其运行状态，检测并预警潜在的故障，降低现场维修的频次和难度。同时，模块化设计使零部件更容易更换，专业的维修团队在无人机、水下机器人等高科技设备的帮助下，可以有效完成海上作业，降低操作人员的安全风险，提高总体运营效率。

其次，运维模式与成本考量。漂浮式海上风电的运维模式，需要从前期投入、运行成本和长期效益三个方面综合考虑。一种常见的模式是建立集监测、预防和应急为一体的综合运维系统，并与定期巡检和按需维护策略相结合。从成本的角度来看，尽管浮动基础、安装及输电设施等前期建设费用较高，但是通过大规模采购、技术创新和政府补贴可以有效降低单位成本。从长远看，有效的运维管理可以显著缩短停工期，提高发电效率与项目效益，弥补高额的初始投入，实现经济效益的最大化^[2]。

最后，环境适应性与可持续性。漂浮式海上风电项目从设计开始就充分考虑到复杂多变的海洋环境，采用防腐蚀材料、抗台风设计和绿色建造技术，确保对海洋生态环境的干扰降到最低。在环境适应方面，通过精准的天气和海况预报，灵活调整维修计划，规避恶劣天气，保证人员安全与设备完好。可持续发展方面，漂浮式风电作为一种清洁、可再生能源，其规模化发展有利于降低对化石能源的依赖，减少温室气体排放量，推动能源结构绿色转型。

3 运维策略与技术手段

3.1 建立完善的运维体系

在建立完善的运维体系时，需要制定详细的运维计划，包括定期检修、预防性维护和突发事件应对程序，保证每个阶段都有明确的标准与操作规范。计划要充分考虑到海洋环境的特点，如风浪、腐蚀等，并针对性地对设备进行保护与维护。构建基于物联网、大数据等技术的智能监控系统，实现对风电机组运行状态及环境参数的实时监控。通过数据分析，提前预警潜在故障，实现精确运维。同时，在海上风电场建设远程控制中心，24小时全天候监控，提高运维效率与响应速度。此外，加强员工培训也是完善运维体系的重要环节。操作人员必须具备专业的海上风电知识，熟悉设备结构及工作原理，并具备快速处理各类故障的能力，通过定期组织培训与演习，提高团队的合作与应急处理能力，以保证在恶劣海况下仍能高效率地完成运维工作。最后，构建与供应商、科研院所等外部资源的协作机制，实现技术信息与资源的共享，持续优化运维策略与技术方法，促进漂浮式海上风电运维系统的不断完善与发展^[3]。

3.2 创新运维技术手段

在运维技术手段的创新上，要积极探索、应用新兴技术，提高运维管理的智能化、自动化水平。首先，将无人机、机器人等技术引入到日常巡检与故障排查中，发挥其灵活、高效率的特点，降低人工风险，提升设备巡检的准确性与效率。此外，无人机还可以搭

载高清摄像机和红外热成像等设备，用于空中监控，及时发现叶片损坏和电缆老化等故障。其次，研发远程故障诊断与维修系统，利用人工智能算法，深度分析采集到的海量运行数据，自动识别故障模式，预测故障发展趋势，提供远程故障解决方案，甚至自动修复，从而大幅缩短故障处理时间。此外，开展漂浮平台自稳定技术及新型防腐蚀材料研究，提升基础设施在恶劣海洋环境中的适应能力，降低环境因素造成的设备损坏，降低运营成本。同时，探索利用波浪能、潮流能等海洋能互补技术，为风电系统提供辅助电源，保障运维工作在极端天气条件下仍能正常运行，进一步提高系统的可靠性与运行效率。

3.3 环境适应性与可持续性

在复杂海洋环境下漂浮式海上风电系统，运维管理策略必须具有较高的灵活性与较强的环境适应能力，这就要求运维队伍既要掌握风电设备的常规维修技术，又要对海洋气象、水文地质等方面有较深的了解，才能在恶劣天气和海况下快速响应、高效处置故障。为实现这一目标，应将智能监测预警系统引入到运营策略中，通过实时采集风速、风向、浪高等环境参量，并结合大数据分析，对可能出现的风电机组故障或安全隐患进行预警，提升运维效率。在可持续性方面，运营策略应以资源回收与节能减排为重点。如利用海上风电机组自产绿色电力进行运维作业，降低对传统化石能源的依赖；积极探索废旧零件循环利用的途径，减少运行过程中产生的废料；加强对运维人员的环境保护培训，增强其环保意识，保证运维活动符合保护海洋生态环境的要求，促进绿色、可持续发展^[4]。

3.4 数字化与智能化提升

随着信息技术的快速发展，漂浮式海上风电系统的运维管理也将步入数字化、智能化的新征程。构建集数据采集、处理、分析与决策支持为一体的综合数字运维平台，是实现高效率运行的关键。利用三维建模与仿真技术，对风电机组的运行状态进行虚拟仿真，为风电机组故障预测和维护决策提供准确依据。结合云计算与边缘计算技术，优化数据处理过程，实现对海量数据的实时分析和响应，提高决策效率。在智能化方面，推进机器学习与人工智能技术在运维管理中的深度应用，实现系统的自主学习、自我优化。例如，利用深度学习算法，自动识别并分类故障类型，快速生成最佳维护方案；通过强化学习，使系统能够在持续运行的情况下对维护和策略进行自适应调整，实现最佳的维护管理效果。同时，智能运维平台还应具备自适应能力，能够根据环境变化、设备状态动态

调整运维方案，保证运维活动始终高效、准确。此外，结合增强现实（AR）与虚拟现实（VR）等技术，为运维人员提供沉浸式培训和支撑。使用AR眼镜，运维人员可在现场实时获取设备信息，进行维护指导，提高维护效率与安全性；利用VR技术模拟复杂故障场景，提高运维人员的应急处置与故障排除能力，为漂浮式海上风电系统的安全、高效运行奠定基础^[5]。

4 案例分析与经验借鉴

漂浮式海上风电作为未来海上风电的重要发展方向，其运营管理面临诸多挑战，下面介绍几个国内外海上风电项目的实例分析和经验可供参考。案例一：挪威 Hywind Demo 项目。挪威的 Hywind Demo 项目是世界上第一个全尺寸漂浮式风电机组样机项目，于2009年启动，位于挪威西南部海岸线10公里的地方，具有2.3MW的单机发电功率。项目组在运维过程中，成功应对风速40m/s、波高19m的挑战，展现出漂浮式海上风电运维的高可靠性与稳定性。案例二：葡萄牙 Wind Float Atlantic 项目，该项目采用半潜式风电机组技术，由

三台 MHI Vestas V164-8.4 MW 海上风电机组成。在复杂海况条件下，项目运维团队采取精细化运维策略，保障风电机组的稳定运行，保障区域稳定供电。案例三：中国“三峡引领号”项目。“三峡领航号”项目是我国第一座漂浮式海上风电平台，并搭载了世界上首台抗台风型漂浮式海上风电机组。项目运维团队具有应对极端天气、海洋环境的丰富经验，采用智能监控系统有效降低运营成本与风险。

从以上案例可以得到如下运维经验：精细化维护策略：针对海情、气象等因素，制定精细化维护策略，保证风电机组安全稳定运行。智能化监测与控制系统：采用数字化、智能化技术，提高风电系统的稳定性与可靠性，增强其故障诊断与防治能力；多场景开发：探索海上风电技术在风光储一体化、智能微网等多种应用场景中的应用，降低综合成本，提高运行效率，具体分析如表二各案例运维管理分析表所示。这些案例与经验为漂浮式海上风电系统的运维管理提供重要参考，对推动我国漂浮式海上风电技术的进一步发展及商业化应用具有重要意义。

案例名称	国家/地区	部署位置	发电功率	运维经验
Hywind Demo	挪威	距离西南海岸线10公里处	2.3MW	成功应对极端天气和海况
Wind Float Atlantic	葡萄牙	距维亚纳堡20公里处	25.2MW	精细化运维策略，确保稳定运行
三峡引领号	中国	广东阳江海上风电场	5.5MW	智能化监测和控制系统，降低运维成本

表二：各案例运维管理分析表

5 结语

综上所述，漂浮式海上风电系统是未来能源的重要组成部分，其运维管理的有效性、可行性是决定其能否正常运行的关键。通过技术创新、模式优化与数字化提升，有效解决运维难题，保证项目的长期稳定运行。结合具体案例分析，广大管理人员应不断积累经验，促进漂浮式海上风电运维管理水平的不断提高，助力我国漂浮式海上风电产业的蓬勃发展，为实现全球碳中和目标贡献力量。

参考文献：

[1] 曾繁昌, 杨潜, 陈乃超, 潘卫国. 漂浮式海上风电系泊系统设计综述 [J]. 能源工程, 2024, 44(06): 32-41.

[2] 胡坤, 吴秀山, 雷镇源, 沈忠明. 漂浮式海上风电运维通达登乘技术研究 [J]. 中国水运, 2024, (19): 131-133.

[3] 喻西崇, 尚景宏, 刘超, 吴雨霏, 王云鹏. 中国海上风电平台通达与登乘技术现状与展望 [J]. 油气储运, 2024, 43(11): 1224-1230.

[4] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 魏超, 杨帅, 潘彬彬. 我国海上风电发展现状与趋势综述 [J]. 发电技术, 2024, 45(01): 1-12.

[5] 赵晓冬, 韩露. 基于实例的海上风电运维母船运维策略评估分析 [J]. 风能, 2023, (07): 84-87.